

# Nuevas técnicas avanzadas para la medida in situ de la corrosión en hormigón armado

## *New advanced electrochemical techniques for on site measurements of reinforcement corrosion*

C. ANDRADE, I. MARTÍNEZ, C. ALONSO y J. FULLEA  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)

Fecha de recepción: 25-IX 2001

ESPAÑA

### RESUMEN

*Las técnicas de medida de la corrosión en hormigón armado se investigan muy poco en comparación con el creciente número de publicaciones sobre este tema. Sin embargo, existen muchas posibilidades y retos que todavía no han sido explorados. En el presente artículo se descubren algunas de las presentes posibilidades de las técnicas electroquímicas, tanto in-situ como en laboratorio. En cuanto a las técnicas in-situ se refiere, se comentan las posibilidades y limitaciones de los métodos actuales de medida de la Resistencia de Polarización,  $R_p$ . Se presta particular atención ante la necesidad de utilizar un anillo de guarda modulado con sensores que controlen esta modulación para obtener valores adecuados de velocidad de corrosión. Después se describen las bases de la nueva técnica relacionada con la medida del estado pasivo en estructuras protegidas catódicamente. También se presentan las bases de un nuevo método de medida de la corrosión sin necesidad de tocar el metal. En cuanto al uso de sensores embebidos, la experiencia, hasta el momento, muestra la difícil interpretación de los datos obtenidos, debido a la importante influencia del efecto de la temperatura. Finalmente, se presentan algunos comentarios sobre la necesidad de trabajar conjuntamente los especialistas en materiales y en estructuras.*

### SUMMARY

*Measurement techniques of reinforcement corrosion are scarcely researched if compared with the increasing number of publications in the subject. However, numerous possibilities and challenges remain without being explored. In present paper mention is made to some of the present possibilities of electrochemical techniques, either on-site or in the laboratory. Concerning on-site techniques it is commented the possibilities and limitations of present methods of measuring Polarization Resistance,  $R_p$ . Particular attention is given to the need to use a modulated guarding with sensors controlling this modulation to obtain accurate values of the corrosion rate. After, description of the basis of new techniques related to the measurements of the passivation state in cathodically protected structures, is made. The basis of a new method of measuring corrosion without the need to touch the metal is also presented. Regarding the use of embedded sensors, the experience until now shows the difficulty of interpretation of the data collected, due to the important influence of ambient temperature. Finally, some comments are presented on the need of joint work of material and structural specialists.*

### INTRODUCCIÓN

Es ampliamente sabido que la corrosión en hormigón armado es actualmente la causa principal de la falta de durabilidad del hormigón. Sin embargo, a pesar de los numerosos artículos publicados sobre el tema, relativamente pocos tratan del desarrollo de técnicas de medida en general, y todavía menos de las medidas de corrosión in situ.

No obstante, es reconocida la importancia de una identificación adecuada (no destructiva in situ) de las

### INTRODUCTION

*It is recognized worldwide that reinforcement corrosion is the main distress behind the present concern regarding concrete durability. However in spite of the very numerous papers published on the subject, relatively few are devoted to the development of measurement of on-site techniques in general, and even less, to the measurement of corrosion.*

*However, it is realised the importance of an accurate (non destructive on-site) identification of the zones*

zonas que sufren corrosión, y la necesidad en estas zonas de evaluar la importancia de esta corrosión, mediante la medida de la pérdida de sección y de la velocidad de este proceso.

Las medidas de velocidad de corrosión se necesitan, o deben ser aplicadas, para:

- a) identificar las zonas corroídas.
- b) predecir la velocidad de corrosión del hormigón armado.
- c) predecir la vida residual de la estructura.
- d) verificar la eficiencia de los sistemas de reparación.

En el presente artículo se realiza una revisión de las técnicas in situ existentes, y del reciente desarrollo de otras nuevas, incluyendo sensores embebidos.

## TÉCNICAS PARA LA MEDIDA DE LA CORROSIÓN IN SITU

### Mapas de potencial y resistividad

Las principales técnicas utilizadas in situ para evaluar la corrosión en hormigón armado son de naturaleza electroquímica, debido a que ésta es la base del proceso de corrosión.

Por su simplicidad, la medida de  $E_{corr}$  (potencial de corrosión o de equilibrio), es el método más utilizado en las determinaciones de campo. A partir de estas medidas pueden dibujarse mapas de potencial que revelan las zonas que son más propicias de sufrir corrosión en el estado activo (1). Sin embargo, como estas medidas tienen carácter cualitativo su interpretación es difícil (2). Esto se debe a que el potencial sólo informa del riesgo de corrosión y no de la actividad en el momento presente. Además, el desarrollo de macropares puede también llevar a conclusiones erróneas ya que las zonas corroídas polarizan los alrededores que pueden parecer también como corroídas cuando son áreas catódicas del macropar. Por ello, estos mapas de potencial tienen todavía la función de lograr una interpretación cualitativa general y actuar como complemento de otras técnicas in situ.

Lo mismo que se ha dicho sobre el potencial sucede con las medidas de Resistividad,  $\rho$  (3), las cuales son utilizadas en algunas ocasiones conjuntamente con los datos de mapeo de  $E_{corr}$ . Los valores de  $\rho$  proporcionan una indicación del grado de humedad que contiene el hormigón, el cual está relacionado con la velocidad de corrosión cuando el acero se está corroyendo activamente, pero cuya interpretación puede llevar a conclusiones erróneas cuando el acero está pasivo.

suffering corrosion, and in these zones, to appraise the importance of this corrosion, that is, the achieved loss in cross section and the rate of its progress.

Corrosion measurements techniques are needed or may be applied for:

- a) identifying corroding zones
- b) predicting the rate of corrosion of reinforcement
- c) predicting the residual life of the structure
- d) monitoring the efficiency of repair systems.

In the present paper, a brief review is made on existing on-site techniques, and on the recent development of new ones including embedded sensors.

## ON SITE TECHNIQUES FOR CORROSION MEASUREMENT

### Potential maps and resistivity measurements

Up to the present the main techniques used on-site for appraising corrosion of reinforcements are of electrochemical nature due to that is the basis of the corrosion process.

Because of its simplicity, the measurement of  $E_{corr}$  (rest or corrosion potential) is the method most frequently used in field determinations. From these measurements, potential maps are drawn which reveal those zones that are most likely to undergo corrosion in the active state (1). However, such maps only have a qualitative character which may make data difficult to be interpreted (2). This is due the potential only informs on the risk of corrosion and not in its actual activity. In addition, the developing of macrocells may as well mislead the deductions because corroding zones polarize the surrounding areas which may seem corroding, when they are simply cathodic areas of the macrocell. In spite of which, potential mapping still has a function to accomplish as a qualitative indication of the general performance and a complement of the other on-site techniques.

The same to that said for the potential can be stated on Resistivity,  $\rho$ , measurements (3), which sometimes are used jointly with  $E_{corr}$  mapping. The  $\rho$  values indicate the degree of moisture content of the concrete, which is related to the corrosion rate when the steel is actively corroding, but which may mislead the interpretation in passive conditions.

El mapa de “riesgo de corrosión” de una losa cuando se combinan ambos,  $E_{corr}$  y  $\rho$ , se muestra como ejemplo en la figura 1.

## Resistencia de Polarización

### Medida en laboratorio

La única técnica electroquímica que proporciona cuantitativamente el valor de la velocidad de corrosión es la Resistencia de Polarización,  $R_p$  (4). Esta técnica ha sido utilizada ampliamente en laboratorio. Se basa en la aplicación de una pequeña perturbación eléctrica al metal mediante un contraelectrodo y un electrodo de referencia. Partiendo de que la señal eléctrica es uniformemente distribuida a través del hormigón, el cociente  $E/I$  define la  $R_p$ . La corriente de corrosión,  $I_{corr}$ , es inversamente proporcional a la  $R_p$ ,  $I_{corr} = B/R_p$ , donde  $B$  es una constante. La  $R_p$  puede ser medida mediante técnicas con corriente continua o alterna (5), ambas tienen características específicas para obtener un valor fiable de velocidad de corrosión que concuerde con la pérdida gravimétrica.

### Medida in situ

La estimación directa de la  $R_p$  Real a partir de la medida de  $\Delta E/\Delta I$  normalmente no es aplicable a estructuras de hormigón armado de gran tamaño. Esto es debido a que la señal eléctrica aplicada tiende a desvanecerse con la distancia al contraelectrodo, CE, distribuyéndose uniformemente a través del electrodo de trabajo, WE, como se muestra en la figura 2. Por lo tanto, la polarización debida a la señal eléctrica no es uniforme y se extiende hasta una cierta distancia que se denomina longitud crítica,  $L_{crit}$ .

A map of “corrosion risk” when combining both,  $E_{corr}$  and  $\rho$ , is shown as an example in figure 1.

## Polarization Resistance

### Laboratory measurements

The only electrochemical technique with quantitative ability regarding the corrosion rate is the so called Polarization Resistance,  $R_p$  (4). This technique has been extensively used in the laboratory. It is based on the application of a small electrical perturbation to the metal by means of a counter and a reference electrode. Providing the electrical signal is uniformly distributed throughout the reinforcement, the  $E/I$  ratio defines  $R_p$ . The corrosion current,  $I_{corr}$ , is inversely proportional to  $R_p$ ,  $I_{corr} = B/R_p$  where  $B$  is a constant.  $R_p$  can be measured by means of D.C. or A.C. techniques (5), both of which have specific features in order to obtain a reliable corrosion current value in agreement with gravimetric losses.

### On site measurements

Direct estimation of true  $R_p$  values from  $\Delta E/\Delta I$  measurements is usually unfeasible in large real concrete structures. This is because the applied electric signal tends to vanish with distance from the counter electrode, CE rather than spread uniformly across the working electrode, WE as shown in figure 2. Therefore, the polarization by the electric signal is not uniform, and it reaches a certain distance that is named the critical length,  $L_{crit}$ .

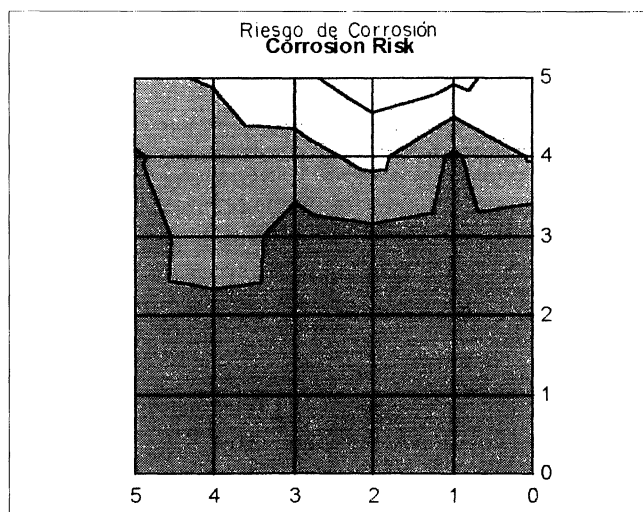


Figura 1.- Mapa de "riesgo de corrosión" de una losa con cloruros.

Figure 1.- "Corrosion risk" map of one slab with chlorides.

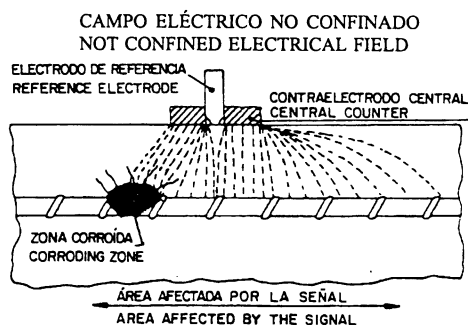


Figura 2.- Señal eléctrica aplicada desde un contraelectrodo pequeño sin confinamiento.

Figure 2.- Electrical signal applied from a small counter without confinement.

Por ello, las medidas de  $\Delta E/\Delta I$  en estructuras de gran tamaño utilizando un contraelectrodo pequeño proporcionan valores de Resistencia de Polarización Aparente ( $R_p^{app}$ ) cuya diferencia con el valor de la  $R_p$  Real depende de las condiciones experimentales (6). Además, si el metal se está corroyendo activamente, la corriente aplicada desde un CE pequeño colocado en la superficie del hormigón es “drenada” eficazmente por las zonas corroídas y tiende a confinarse ella misma a una pequeña superficie (como se muestra en la figura 2). Por el contrario, si el metal está pasivo y la  $R_p$  es alta, la corriente aplicada tiende a difundirse hasta cierta distancia (ej. alrededor de 50 cm) desde el punto de aplicación. Por ello, la  $R_p$  Aparente se parece a la  $R_p$  Real en casos de corrosión activa del hormigón armado, pero cuando el acero está pasivo, la larga distancia alcanzada por la corriente precisa de un tratamiento cuantitativo diferente.

#### Confinamiento modulado de la corriente (método del anillo de guarda)

Hay distintos métodos para calcular el valor de la  $R_p$  Real, de entre los cuales, el más extendido, es el uso del anillo de guarda (6). Este método requiere una  $R_p$  determinada del acero, como muestra la figura 3. La medida se realiza aplicando un pulso galvanostático, al menos durante 30-100 segundos, desde el contraelectrodo central. Después, otra contracorriente se aplica desde el anillo externo, y esta corriente externa es modulada por medio de dos electrodos de referencia llamados “controladores de anillo” para conseguir equilibrar las corrientes interna y externa que permiten un correcto confinamiento y, por tanto, el cálculo de la  $R_p$  Real. Por medio de esta delimitación eléctrica del área polarizada a una pequeña zona, cualquier picadura puede ser, primero, localizada y, después, medida, minimizando los errores inherentes de la  $R_p$  Aparente.

Por otro lado, no todas las técnicas con anillo de guarda son eficaces. Sólo si se usa un “confinamiento modulado” controlado por los dos pequeños sensores situados entre el electrodo auxiliar central y el anillo, mostrado en la figura 3, se es capaz de confinar eficazmente la corriente a un área determinada. El uso de anillos de guarda sin control conduce a valores de  $I_{corr}$  demasiado altos donde tendrían que ser moderados

Hence,  $\Delta E/\Delta I$  measurements on large structures using a small counter electrode provides an Apparent Polarization Resistance ( $R_p^{app}$ ) that differs from the True  $R_p$  value depending on the experimental conditions (6). Besides, if the metal is actively corroding, the current applied from a small CE located on the concrete surface is ‘drained’ very efficiently by the rebars and it tends to confine itself on a small surface area (as shown in figure 2). Conversely, if the metal is passive and  $R_p$  is high, the current applied tends to spread far away (e.g., around 50 cm) from the application point. Therefore, the Apparent  $R_p$  approaches the True  $R_p$  for actively corroding reinforcement. But when the steel is passive, the large distance reached by the current needs a quantitative treatment.

#### Modulated confinement of the current (guard ring method)

There are several ways of accounting for a True  $R_p$  value, among which the most extended one is the use of the guard ring method. This method requires a  $R_p$  determined for a particular rebar area, as figure 3 depicts. The measurement is made by applying a galvanostatic step, lasting 30-100 seconds, from the central counter. Then, another counter current is applied from the external ring, and this external current is modulated by means of the two reference electrodes called “ring controllers” in order to equilibrate internal and external currents, which enables a correct confinement, and therefore, calculation of  $R_p$  True. By means of this electrical delimitation to a small zone of the polarized area, any localised spot or pit can be first, localised, and second its measurement can be made by minimising the inherent error of Apparent  $R_p$ .

However, not all guarded techniques are efficient. Only that using a “modulated confinement” controlled by two small sensors placed between the central auxiliary electrode and the ring, shown in figure 3, is able to efficiently confine the current within a predetermined area. The use of guard rings without this control leads into too high values of the  $I_{corr}$  for moderate and low



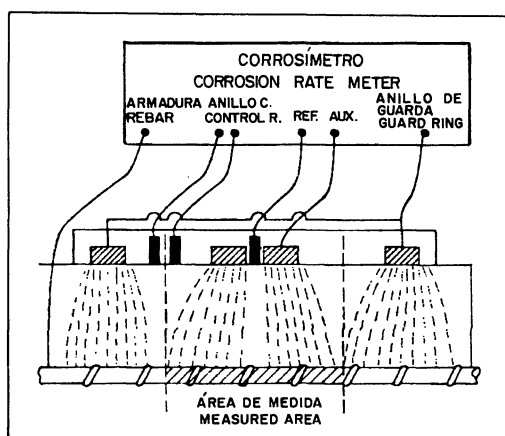


Figura 3.- Esquema del confinamiento modulado de la corriente.

Figure 3.- Modulated confinement of the current scheme.

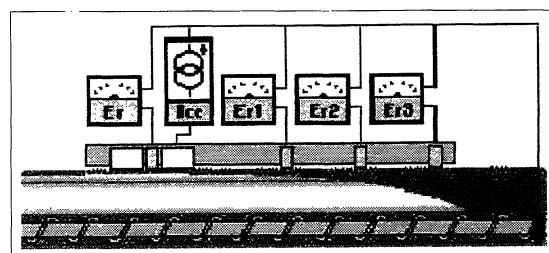


Figura 4.- Técnica de atenuación del potencial para la medida de la longitud crítica.

Figure 4.- Potential attenuation technique for the measurement of critical length.

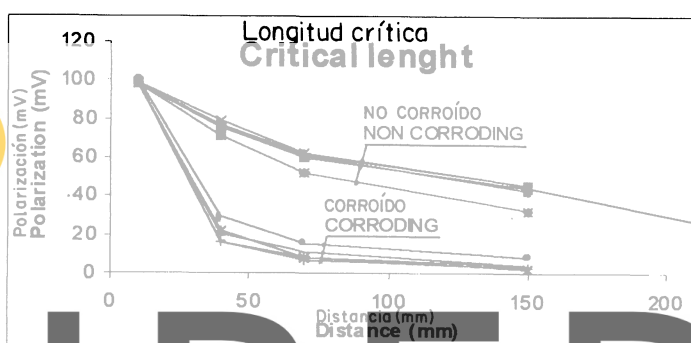


Figura 5.- Atenuación del potencial con la distancia en estructuras activas y pasivas.

Figure 5.- Potential attenuation with the distance in active and passive structures.

o bajos, y el error introducido en el caso de picaduras muy localizadas también es muy alto (figura 2).

values, and the error introduced in the case of very localized pits, is very high as well (figure 2).

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Método de la atenuación del potencial

Potential attenuation method

Cuando el hormigón está muy húmedo, La agresividad del hormigón puede ser tan baja que no se puede llegar a confinar la corriente dentro del anillo de guarda, por ser el área polarizada muy grande. Para estas condiciones se ha desarrollado otro método de medida, el llamado de "atenuación del potencial con la distancia" (6), que se basa en la medida directa de la longitud crítica. El sensor está formado, en este caso, por un pequeño disco que actúa de único contra-electrodo y que lleva en su centro un electrodo de referencia para la medida del  $E_{corr}$  como se muestra en la figura 4. Otros tres electrodos de referencia se alinean con éste a distancias predeterminadas.

When the concrete is very wet, its resistivity may be so low that the confinement by the guard ring of the current cannot be well achieved because the area polarized is very large. For these conditions, another measurement method has been developed, the so called measurement of the "potential attenuation with the distance" (6) which is based in the direct measurement of the critical length. The sensor is formed in this case, by a small disc acting as the only counter electrode which has in its center the reference electrode for the recording of  $E_{corr}$  as is depicted by figure 4. Other three reference electrodes are placed aligned with the  $E_{corr}$  one at fixed distances.

Para efectuar la medida se aplica a la barra un escalón potencioestático que dura entre 30 y 100 segundos. El salto de potencial aplicado se atenúa con la distancia, como se muestra en la figura 5. A partir de la distancia

For the measurement, a potentiostatic step, lasting between 30-100 seconds, is applied to the bar. This applied potential step attenuates with the distance as observed in figure 5. From the distance ( $L_{crit}$ ) reached by

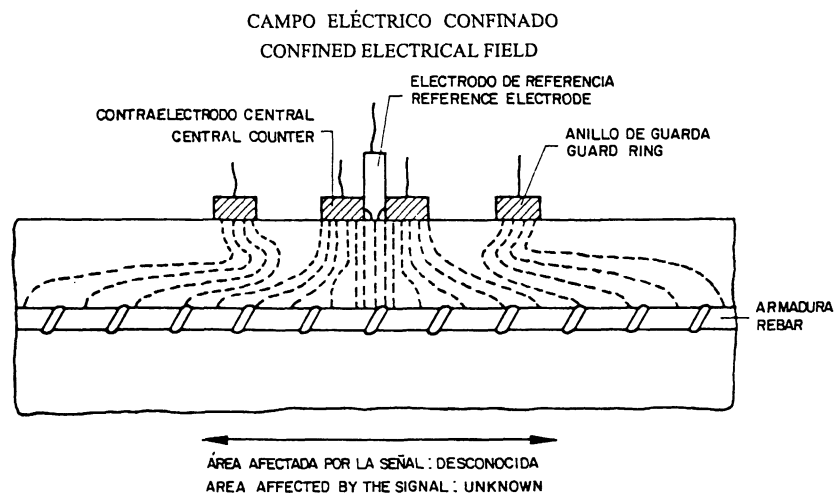


Figura 6.- Esquema de la medida con confinamiento no modulado.

Figure 6.- Non modulated confinement measurement scheme.

alcanzada ( $L_{crit}$ ) por la señal y ciertas consideraciones geométricas a partir del diámetro de las barras, es posible calcular la  $R_p$  Real (referida a un área conocida del acero).

Este método no se aplica al caso normal de hormigones no muy húmedos debido a que no puede localizar zonas de corrosión aisladas. Así, en la figura 2 se mostraba el sensor a una cierta distancia (menor de 50-100 cm) de la zona corroyéndose. Cuando se aplica el escalón de potencial, esta zona "drena" la corriente y, por lo tanto, se miden elevados valores de  $I_{corr}$ , a pesar de que el sensor no se coloque justo encima de la zona corroyéndose.

Como cuando el hormigón está muy húmedo, la corrosión suele ser generalizada y es muy improbable que se produzca una corrosión muy localizada, entonces el método de la atenuación del potencial se puede aplicar sin errores significativos.

### Métodos de pulso galvanostático

Estos métodos consisten en medir la corriente o el potencial justo después de aplicar la señal eléctrica (7) sin esperar los 30-100 segundos usuales necesarios para alcanzar un cierto estado estacionario (4, 5). Aunque puedan ser más o menos exactos cuando se aplican a probetas de pequeño tamaño, para las medidas in-situ no son apropiados pues el modelo analógico que se usa para el cálculo de la  $R_p$  es el de Randles, que no reproduce la atenuación del potencial con la distancia (8) y, por lo tanto, se pueden obtener grandes errores.

El intento de mejorar el método del pulso galvanostático por medio de incorporarle un anillo de guarda (no modulado) no sólo no ha introducido ninguna mejora, sino que puede, incluso, producir mayores errores por sobreconfinamiento.

the signal and certain geometrical considerations of the bars diameter, it is possible to calculate the true  $R_p$  (referred to a particular steel area).

This method is not applied for normal non-wet concretes due to it cannot, in these cases, localize well the isolated corroding areas. Thus in figure 2 it has been shown that a sensor is placed at a certain distance (smaller than 50-100 cm) of a corroding zone. When the potential step is applied, this zone "drains" the current and therefore, high values of  $I_{corr}$  are measured in spite the sensor is not placed just above the corroding zone.

Being the concrete very wet the corrosion is usually generalized and seldom occurs that the corrosion is very localized, therefore, the method of potential attenuation can be applied without significant errors.

### Galvanostatic pulse methods

These methods consist in measuring the current or potential just after application of the electrical signal (7) instead of waiting the usual 30-100 seconds needed for achieving a certain steady-state period (4, 5). Although they can be accurate when applied to small specimens, for on-site measurements they are not appropriate as the analogue model used for the  $R_p$  calculation is the Randles one, which does not reproduce the potential attenuation with the distance (8) and therefore gross errors can be obtained.

The attempt to improve the galvanostatic pulse method by means of using a guard ring (not modulating) has not introduced any improvement but sometimes even introduces larger error due to overconfinement.

## Nuevas técnicas avanzadas de medida de la corrosión

Muy recientemente se han desarrollado dos nuevas técnicas que se describen a continuación:

1ª) Una se ha llamado “Técnica de Verificación de la Pasividad”, PVT (9) que se aplica cuando la armadura o el acero está protegido catódicamente o cuando existen dudas sobre el estado de pasividad de la armadura y

2ª) La otra se ha llamado “Método Inductivo sin contacto”, NCI, con el metal que es capaz de medir la velocidad de corrosión sin necesidad de hacer la conexión física con el mismo.

### Técnica de verificación de la pasividad

La protección catódica es el único método capaz de parar una corrosión en desarrollo. Aplicando una polarización catódica, el potencial de corrosión se desplaza hasta la zona de inmunidad del diagrama del Pourbaix y la corrosión se detiene desde un punto de vista práctico.

Hasta ahora los únicos métodos capaces de verificar la eficacia de la protección catódica necesitan desconectar la corriente aplicada para medir el potencial sin caída óhmica (método del “instant-off”) o registrar la curva de despolarización durante más horas (curva de evolución del potencial, figura 7) para medir la diferencia del potencial entre el instante de desconexión y el registrado después de 4-24 h o más (el criterio de los 100 mV, por ejemplo). Ninguno de estos métodos es totalmente fiable debido a su empirismo y, por tanto, se aprecia en la literatura una continua controversia al respecto (9).

## New advanced techniques of corrosion measurements

Two other techniques very recently developed will be described:

1ª) The first one has been called “Passivation Verification Technique”, PVT, which can be applied when the reinforcement or the steel is cathodically polarized, or when there are doubts on whether the rebar is actively corroding and

2ª) The other has been called the “non contacting inductive”, NCI, technique, which is able to measure the corrosion rate without the need to make the physical connection with the metal.

### Passivation verification technique

The cathodic protection is the only method able to stop an on-going corrosion. By means of applying a cathodic polarization, the corrosion potential is moved to the region of “immunity” of Pourbaix's diagram and the corrosion is stopped from a practical point of view.

Until now the only methods available for verifying the efficiency of the cathodic protection need to switch off the applied current for measuring the potential without the ohmic drop (instant-off potential method) or to record the depolarizing curve during some hours (potential decay, see figure 7), in order to measure the difference in potential between this switch-off and that recorded after 4-24 hours or more (100 mV criteria, for instance). Any of these methods are fully reliable due to their empirism and a continuous controversy on the optimum measurement parameters is realized in the literature (9).

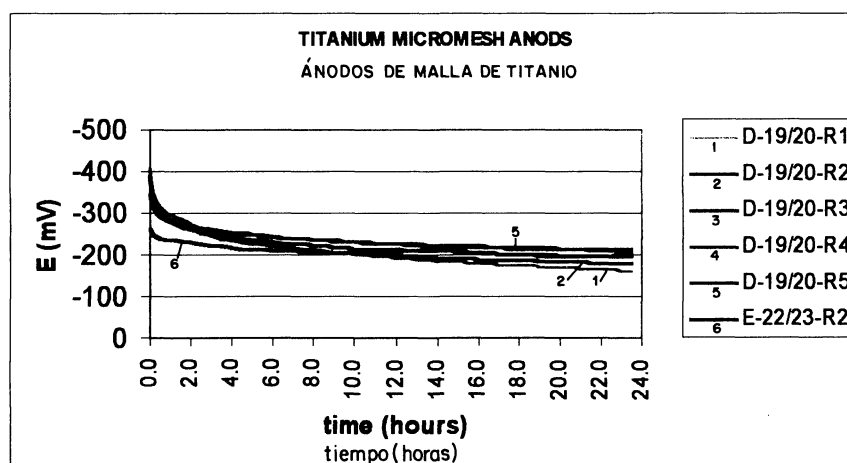


Figura 7.- Despolarización durante 24 horas en una estructura protegida catódicamente con malla de titanio.

Figure 7.- 24 hours potential decay on a cathodically protected structure with titanium micromesh anods.

La PVT se ha desarrollado precisamente para ser aplicada sin desconectar la corriente. Usa el sensor de confinamiento (figura 3) para delimitar el área y se basa en la aplicación de una corriente alterna (en vez de continua) a partir del contraelectrodo central. La respuesta se analiza a una serie de frecuencias diferentes.

La expresión de los resultados se hace en forma de porcentaje de protección. La figura 8 muestra la representación de numerosas medidas como “nivel de protección” frente a potencial (incluyendo la caída óhmica). El nivel de protección límite se ha fijado en el 90%, considerando que niveles inferiores representan una eficacia no completa (no protegido) de la protección catódica.

La PVT se puede aplicar también a estructuras sin protección catódica cuando se quiera verificar si la armadura se está, corroyendo o no, activamente. Aunque se necesitan **mas** ensayos, la PVT se podría usar en el futuro **para complementar** las medidas de  $R_p$  y **averiguar si un resultado** particular está informando fiablemente del estado de la corrosión.

#### Técnica inductiva sin contacto

El método **se desarrolló** al comprobar que un campo magnético **como** el producido por los pachómetros, aplicado en la superficie del hormigón, es capaz de polarizar **por inducción** la armadura. El mismo fenómeno **inductivo** puede producirse sobre la armadura cuando **se aplican** corrientes alternas o continuas entre dos electrodos colocados en la

*The PVT has been developed precisely for being applied without switching off the current. It uses the confinement sensor (figure 3) for delimitating the area and is based in applying an A.C current (instead of a D.C step) through the central counter electrode. The response is analyzed at a set of different frequencies.*

*The expression of the results is given as percentage of protection. Figure 8 shows the representation of numerous measurements as “protection level” versus potential (including ohmic drop). The threshold level of protection has been fixed in around 90%, considering that lower protection levels represent a not full efficiency (non protected) of the cathodic protection.*

*The PVT can be also applied when no cathodic protection is operating for simply verifying if the reinforcement is actively corroding or not. Although still more results are needed, the PVT may be used in the future to complement  $R_p$  measurements in order to find out whether a particular result is reliably informing on the corrosion state.*

#### Non contacting inductive technique

*The method was developed when realising that a magnetic field applied from the concrete surface, is able to polarize the reinforcement by induction. The same inductive phenomenon can be produced on the reinforcement when applying alternate currents or direct currents between two electrodes placed on the*

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

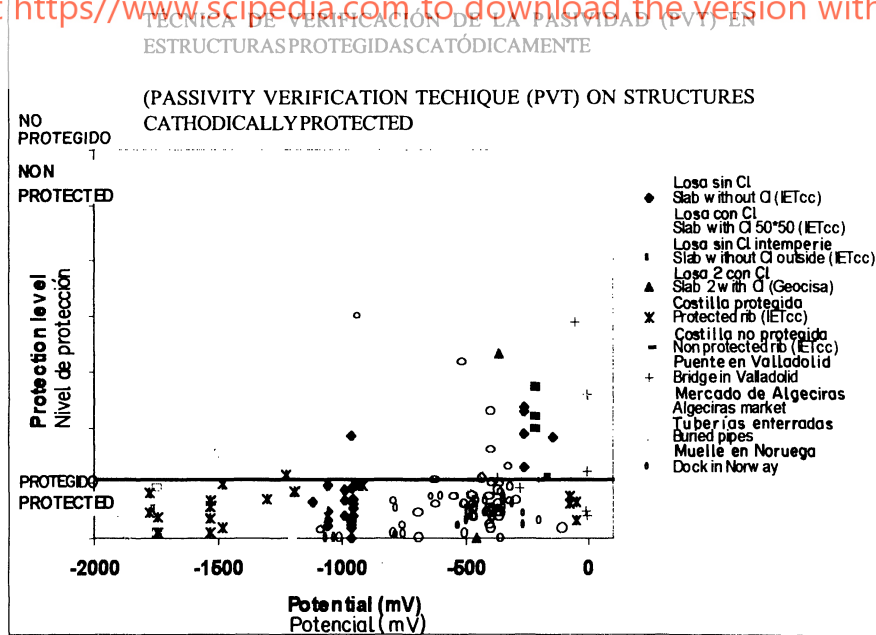


Figura 8.- Resultados obtenidos en PVT.

Figure 8.- Results obtained in PVT.



superficie del hormigón. Es decir, una corriente eléctrica circulando a través del hormigón o de un electrolito es capaz de polarizar la armadura (figura 9). El acero se polariza por separación de cargas eléctricas (inducción) que tratan de oponerse a las de signo positivo o negativo del electrodo más cercano.

Como la  $R_p$  es la relación entre el salto de potencial y la corriente aplicada, la dificultad aparece en cómo se registra el parámetro conjugado, voltaje o corriente, sin tocar el electrodo de trabajo. La dificultad fue superada al darse cuenta de un segundo principio: cuando un metal se polariza por inducción, todas las cargas eléctricas se localizan en su superficie y, por lo tanto, la  $R_p$  se puede obtener mediante la medida independiente de la resistencia óhmica del dispositivo y aplicándole la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_{pi}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{oh}} \quad [1]$$

Donde  $R_{pi}$  es la  $R_p$  obtenida mediante el método NCI,  $R_i$  es la resistencia a la inducción de todo el dispositivo y  $R_{oh}$  es la resistencia óhmica del mismo dispositivo sin la presencia del metal. Esta ecuación supone que el camino de la corriente va en paralelo por el electrolito (hormigón) y la armadura (Figura 9, circuito de Randles)

La  $R_{pi}$  se puede escribir en función de la corriente aplicada ( $I_{ap}$ ) y el voltaje inducido ( $V_{ind}$ ) de la siguiente forma:

$$R_{pi} = \frac{R_{oh} \cdot V_{ind}}{R_{oh} \cdot I_{ap} - V_{ind}} \quad [2]$$

Este método está todavía en una fase preliminar y será la base de una nueva serie de métodos de medida in situ que no necesitan hacer contacto con la armadura y que se desarrollarán en el futuro. Finalmente, hay que resaltar que el método inductivo cuando se aplica a estructuras de gran tamaño, el potencial también se

surface of the concrete or an electrolyte (figure 9). That is, an electrical current circulating through the concrete is able to polarize the reinforcement. The steel is polarized by separation of charges (induction) which try to counter-balance the positive or negative sign of the closer electrode.

Being the  $R_p$  the ratio between the potential shift and the current applied, the difficulty arose on how to record the conjugated parameter, voltage or current, without touching the working electrode. The difficulty was overcome by realising a second principle: when a metal is inductively polarized, all the electrical charges lie on its surface and therefore, the  $R_p$  can be obtained by an independent measuring of the ohmic resistance of the arrangement, and applying the following equation:

Where  $R_{pi}$  is the polarization resistance obtained through the NCI technique,  $R_i$  is the resistance to the induction of the arrangement, and  $R_{oh}$  is the ohmic resistance of the same arrangement of electrodes without the presence of the metal. This equation assumes a path in parallel for the current going through the metal and that going through the concrete (the electrolyte) (Figure 9).

The  $R_{pi}$  in terms of the current applied ( $I_{ap}$ ) and induced polarization ( $V_{ind}$ ) will be:

This method is still in its preliminaries and will be the base of a new set of methods that will be developed in the future for measuring on site not needing to make electrical contact with the reinforcement. To end it is necessary to remark that, when the inductive method is applied in large structures, the potential also attenuates

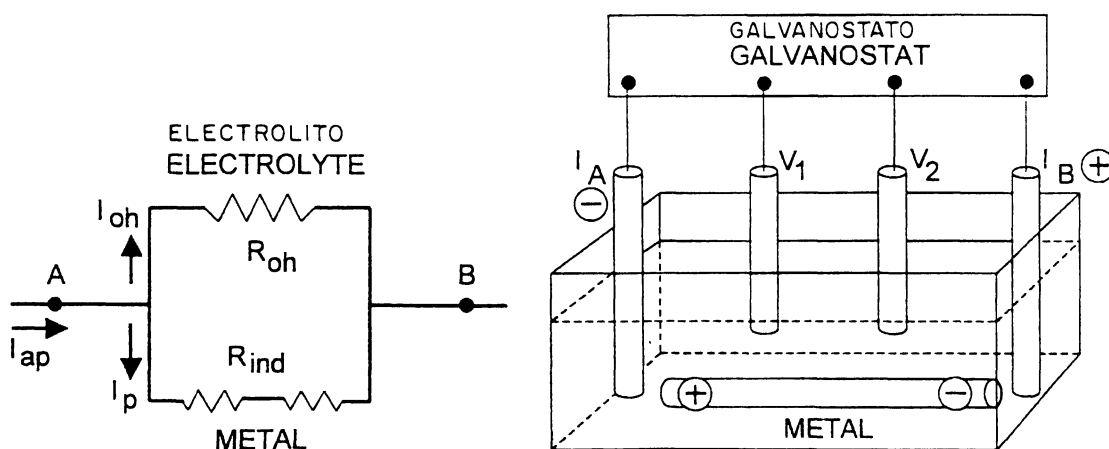


Figura 9.- Método inductivo de medida que no necesita tocar el electrodo de trabajo.

Figure 9.- Non contacting inductive method for measuring corrosion.

atenúa con la distancia y, por tanto, para ser aplicado in-situ se necesita un confinamiento.

## SENSORES EMBEBIDOS

La introducción de pequeños sensores en el interior del hormigón, normalmente cuando se fabrica, es uno de los desarrollos más prometedores para controlar el comportamiento a largo plazo de las estructuras. Lo más usual, como en el caso de las técnicas no permanentes, es embeber electrodos de referencia o de resistividad eléctrica. Estos electrodos pueden informar sobre la presencia de humedad y la evolución del potencial de corrosión. Otros eventos que pueden ser controlados son el avance del frente carbonatado o de cloruros, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura, deformaciones en el hormigón y la velocidad de corrosión.

Un ejemplo particular del uso de sensores embebidos lo constituye el almacenamiento de residuos de media y baja radioactividad situada en El Cabril (Córdoba) (10). Allí, se ha instrumentado un contenedor piloto con 27 grupos de sensores desde 1995. La evolución de los parámetros que se controlan son: temperatura, deformaciones del hormigón, potencial de corrosión, resistividad, disponibilidad de oxígeno y velocidad de corrosión. El impacto de la temperatura en varios de estos parámetros es muy notable y, por lo tanto, hay que ser muy cuidadoso a la hora de interpretar los resultados.

## COMENTARIOS FINALES

La corrosión de la armadura del hormigón es una de las justificaciones más frecuentemente utilizadas en numerosos estudios de los que se realizan actualmente sobre la durabilidad; sin embargo, en muy escasas ocasiones la corrosión es correctamente medida e interpretada, ya que son muy escasos los especialistas que conocen en profundidad la forma de realizar medidas de  $R_p$  en el laboratorio y es aún menor el número de investigadores que ha tenido acceso a datos en estructuras reales.

Este relativamente pequeño número de estudios, en los que las técnicas de medida de la corrosión son aplicadas, es uno de los motivos por los que, a pesar de las numerosas publicaciones, los avances que se constatan son pequeños. Es, pues, necesario el trabajo conjunto de especialistas en métodos electroquímicos de corrosión junto con las demás investigaciones en la materia.

En cuanto al estado del conocimiento sobre las técnicas en sí mismas, es necesario resaltar que los avances realizados en la medida in situ de la corrosión en

with the distance and therefore, for being applied on-site, a confinement will be necessary.

## EMBEDDED SENSORS

The introduction of small sensors in the interior of the concrete, usually when placing it on-site is being one of the most promising development in order to monitor the long term behaviour of the structures. The most usual, as in the case of non-permanent on-site techniques, is to embed reference electrodes or resistivity electrodes. They can inform in the presence of moisture and evolution of corrosion potential. Others events that can be monitored are the advance of the carbonation or chloride fronts, the oxygen availability, temperature, concrete deformations and the corrosion rate.

A particular example of the use of embedded sensors is the case of storage facilities of low and medium radioactive wastes in El Cabril (Córdoba) (10). There, a pilot container has been instrumented by embedding 27 set of electrodes from 1995. The parameters controlled are temperature, concrete deformation, corrosion potential, resistivity, oxygen availability and corrosion rate. The impact of temperature on several of the parameters is remarkable, and therefore, care has to be taken when interpreting on-site results.

## FINAL COMMENTS

The corrosion of reinforcements is one of the justifications that most often without the watermark numerous studies being at present developed related to durability, however, in very few occasions the corrosion is correctly measured and interpreted, because there are very scarce the specialists that know thoroughly how to measure  $R_p$  in the laboratory and, they are even more scarce, the reserachers that have been studied on-site results.

This relatively small number of studies where corrosion measurement techniques have been applied, is one of the reasons why, in spite of the numerous papers, the advance is small. It is then necessary that specialists in electrochemical corrosion techniques work together with the other specialists in the subject.

Concerning the state of the art on on-site corrosion techniques themselves, it is necessary to remark that the advances achieved are much more important than in other systems. In spite of it, several aspects

estructuras de hormigón, es mucho mayor que el alcanzado en otros sistemas. A pesar de ello, quedan bastantes aspectos por mejorar para poder hacer de la medida de la corrosión una técnica imprescindible y rutinaria de cualquier estudio sobre el comportamiento estructural de estructuras corroídas.

*than in other systems. In spite of it, several aspects remain to be improved in order to achieve the goal of making measurements of reinforcement corrosion a necessary and routine technique for any structural assessment of corroding structures.*

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) ASTM C876-91. "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".
- (2) Elsener, B and Böhni, H. Corrosion Rates of Steel in Concrete, N.S. Berke, V. Chaker and D. Whiting (Eds.), ASTM STP 1065, 1990, pp. 143-156.
- (3) Millard, S. G. and Gowers, K. R., "Resistivity assessment of in situ concrete: the influence of conductive and resistive surface layers", Proc. Inst. Civil Engrs. Struct. & Bldgs, 94, 1992, paper 9876, pp.389-396.
- (4) Andrade, C. and González, J. A., "Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements", Werkst. Korros., 29, 515 (1978).
- (5) Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C. and González, J.A., "The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the  $R_p$  and A.C. Impedance methods," ASTM-STP 906, 1986, pp. 43-64.
- (6) Feliú, S., González, J. A., Feliú, S. Jr., and Andrade, C., "Confinement of the electrical signal or in situ measurement of Polarization Resistance in Reinforced concrete," ACI Mater. J., 87, (1990), pp 457.
- (7) Feliú, S., González, J. A., Andrade, C., "Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures". Journal of applied electrochemistry. Págs. 305-309 (1996).
- (8) Elsener, B., Klinhoffer, O., Frolund, T., Rislund, E., Schiegg, Y., Böhni, H., "Assessment of reinforcement corrosion by means of galvanostatic pulse technique" International Conference on Repair of Concrete Structures. From theory to practice in a Marine Environment. Svolvær, Norway 20-30 may 1997. Edited by A. Blankvoll, Norwegian Public Road Administration, pp 391-400.
- (9) Rilem Recommendations of TC 154-EMC-Electrochemical Techniques for measuring corrosion in concrete. Progress Report 1994-97 Materials and Structures., vol.31, april 1998, pg. 153-157.
- (10) Andrade, C., Martínez, I., Ramírez, M., Jiménez, F. "Medida de la eficacia de la protección catódica en estructuras de hormigón". Congreso Internacional Colloquia 2001, Madrid, abril 2001, Ed.: O. Río, J. P. Gutiérrez, C. Andrade. Publicado por AMIET.
- (11) Andrade, C.; Sagrera, J. L.; González, J. A.; Jiménez, F.; Bolaños J. A.; Zuloaga P. "Corrosion monitoring of concrete structures by means of permanent embedded sensors". Proceedings g. Eurocorr'96, Niza (1996).

\* \* \*